

氏 名	しらうゝ いった ていーらぬたらーのん シラヴィット ティーラヌタラーノン
本籍(国籍)	タイ
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博 第253号
学位授与年月日	平成27年 3月23日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当 課程博士
研究科及び専攻	工学研究科電気電子・情報システム工学専攻
学位論文 題目	A research on digital holographic three-dimensional imaging spectrometry ( デジタル分光ホログラフィーの研究 )
学位審査委員	主査 准教授 吉森 久 副査 教授 西山 清 副査 教授 安倍 正人

### 論文内容の要旨

本論文は、干渉計測と計算処理に基づいて、一般的な3次元多色物体のもつ3次元情報と連続スペクトル情報を同時取得するデジタル分光ホログラフィー(Digital holographic 3-D imaging spectrometry)の手法を実験的に検証し、この手法により取得された3次元分光画像の3次元結像特性の研究をまとめたものである。

本論文で述べる分光立体(3次元)計算イメージング技術であるデジタル分光ホログラフィーの特徴は、測定の際にレーザーのようなコヒーレント光を使用せず、また特別な分光素子や結像素子も不要である点であり、原理的に多色光源から伝搬したインコヒーレント光の干渉計測と信号処理のみによって、3次元空間情報と連続スペクトル情報が取得可能である。

本手法では、回転シアリング干渉計をベースとした光学系である2光波折り畳み干渉計を用い、測定対象である時間・空間的にインコヒーレントな一般の多色物体から伝搬した光波に対し、干渉計測をおこない、5次元のインターフェログラムを取得する。この5次元インターフェログラムに対して合成開口処理を適用することにより、体積型(3-D)のインターフェログラムを得る。次に、この体積インターフェログラムに対し、分光処理を行うことにより2次元の相互スペクトル密度のデータセットを取得する。これらの相互スペクトル密度は、各波長成分毎の複素インコヒーレントホログラムと同等な物体情報を持っており、これらの複素ホログラムから個別に再生処理を行うことで物体の各波長成分に対応した物体の3次元分光立体画像のセットが得られる。

第1章では、本研究の背景、目的、ならびに本論文の構成、概要について述べる。

第2章では、光波の基本的性質について述べ、光波の数学的記述を示す。また、本研究と関連の深い先行知見としてフーリエ分光法(Fourier Transform Spectroscopy)、ファンシッター・ゼルニケの定理(Van Cittert-Zernike Theorem)について説明する。さらに、3次元空間コヒーレンス関数を計測する概念及び具体的

手法について触れ、これらを利用した多重分光立体画像の再生手法について述べる。

第3章では、本研究で利用する2光波折り畳み干渉計について説明し、この実験系によって取得されるインターフェログラム・空間コヒーレンス関数の数学的記述について示す。そして、このインターフェログラムに適用する合成開口処理について述べ、さらに3次元分光立体画像を取得する処理について説明する。

第4章では、本手法の実験的検証として、空間的に3次元形状と連続スペクトル形状が異なるインコヒーレントな多色物体の実験結果を示す。

この実験では、測定対象として、互いに異なる連続スペクトルを有し、かつ空間的に異なる位置及び奥行きに配置された複数の面光源を作成し、それらの3次元空間情報と連続スペクトル情報(3次元分光立体画像)を同時かつ独立に取得できることを確認した。

第5章では、第4章で得られた手法によって、空間的にインコヒーレントなスペクトル成分毎の3次元像を解析し、この像上の任意の点における連続スペクトルの再生が可能であることを確認した。また、分光された3次元像の3次元イメージングに関する分光特性及び3次元結像特性に関して実験的に調べ、インコヒーレントホログラフィーの3次元結像特性、特に奥行き方向の結像特性に関し考察した。さらに、この手法において相互スペクトル密度に記録された光源の可干渉領域(コヒーレンスエリア)が、分光された3次元再生像における空間分解能に与える影響を調べる実験を行い、その実験結果に基づいて考察した。

その結果、物体から伝搬した光波の観測面における可干渉領域は光源の距離・大きさに依存して変化し、また再生像はこの可干渉領域から逆伝搬した光による寄与が大部分を占めるが、横方向の分解能は可干渉領域の広がりによって決定されるものではないことがわかった。再生像の横方向分解能を実質的に決定する要因は、空間相関関数の大きさと雑音の大きさが等しくなる程度の観測領域(開口)の広がりである。同様に、奥行き分解能もこの観測領域の広がりによって決まると考えられた。

第6章では、研究を統括し、総合的な見地から考察を行う。そして、今後の検討課題についても触れる。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、特別な光源や結像素子・分散素子を利用せずに、物体から伝搬した光の干渉性に基づく純粋な干渉計測と計算機処理のみによって、物体の3次元空間情報と連続スペクトル情報を同時に取得する手法を提案している。この手法(デジタル分光ホログラフィーと呼ぶ)を実験的に検証し、取得された3次元分光画像の3次元結像特性に関する一連の研究をまとめたものである。本手法では、2光波折り畳み干渉計を用い、測定対象である時間・空間的にインコヒーレントな一般の多色物体から伝搬した光波に対し干渉計測を行い、5次元のインターフェログラムを取得する。この5次元インターフェログラムに対して合成開口処理を適用することにより、3次元インターフェログラムを得る。次に、この体積インターフェログラムに対し、分光処理を行うことにより2次元の相互スペクトル密度のデータセットを取得する。これらの相互スペクトル密度は、スペクトル成分毎の複素インコヒーレントホログラムと同等な物体情報を持っており、これらの複素ホログラムから個別に再生処理を行うことで各スペクトル成分に対応した物体の分光立体画像のセットが得られる。本論文は全6章で構成されている。

第1章では、本論文の先行研究として測定対象の空間・分光情報を取得する干渉計測法の代表例を紹介し、ならびに本論文の新規性、目的、構成に関し述べている。

第2章では、3次元空間コヒーレンス測定の原理と光波の波動性に基いた光の基本的性質について述べ、その数学的記述を示している。また、本研究と関連の深いフーリエ分光法とファンシッター・ゼルニケの定理を紹介している。さらに、本研究の基礎となる3次元空間コヒーレンス関数計測の概念及び具体的手法について説明し、これらを利用した多重分光立体画像の再生手法について述べている。

第3章では、提案したデジタル分光ホログラフィーの原理を数学的に定式化している。先ず実験で利用する2光折り畳み干渉計による5次元インターフェログラムに記録された空間コヒーレンス関数について述べている。次に、体積インターフェログラムを生成するために、5次元インターフェログラムに対し合成開口処理を適用することで、次元圧縮を行う。さらに、分光処理によりスペクトル成分毎の相互スペクトル密度を回復する手法について述べ、最後にこれらの複素ホログラムから、角スペクトル伝搬則を利用した分光立体画像の再生処理過程を説明している。

第4章では、第3章で説明した2光波折り畳み干渉計と合成開口処理を用いたデジタル分光ホログラフィーによって、実際に多色物体の3次元空間情報と連続スペクトル情報を同時に取得する実験について述べている。ここでは、一般的な多色物体として空間的にインコヒーレントで互いに異なる連続スペクトルを有する複数の面光源を作成している。これを測定対象として多数のスペクトル成分に関する3次元画像の再生実験を行い、実際に提案手法によって分光された3次元画像のセットが取得可能であることを世界ではじめて示している。

第5章では、連続スペクトルを有する空間的にインコヒーレントな光源分布の分光・結像特性を調べる実験を行い、デジタル分光ホログラフィーにおいて再生されたスペクトル成分毎の3次元画像に関する分光特性及び3次元結像特性、特に奥行き方向に関する結像特性に関し詳細に調べている。さらに、この手法において観測面における伝搬光の可干渉領域（コヒーレンスエリア）の広がりや再生像の3次元空間結像特性に関する関係を調べ、その実験結果に関し考察している。この研究は、3次元イメージングの奥行き方向分解能に関する先駆的研究である。

第6章は結論であり、第2章から第5章までを総括し、本研究で得られた成果をまとめている。また、今後の検討課題についても述べている。

以上、本論文では、空間的にインコヒーレントな多色物体の3次元形状情報と連続スペクトル情報を同時取得する方法を提案し、実験的に検証した世界初の研究成果をまとめたものであり、新しい技術的可能性を示唆していることから当該研究分野および関連利用分野の進展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。

#### 原著論文名

S. Teeranutranton and K. Yoshimori, "Digital holographic three-dimensional imaging spectrometry," *Appl. Opt.* 52, A388–A396 (2013).